

На правах рукописи

Бугай Александр Николаевич

**КВАЗИОДНОМЕРНЫЕ УЕДИНЕННЫЕ ВОЛНЫ В ТВЕРДЫХ  
ТЕЛАХ**

Специальность 01.04.05 - оптика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Казань - 2008

**Работа выполнена на кафедре теоретической физики  
физического факультета Российского государственного  
университета им. И.Канта**

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
Сазонов Сергей Владимирович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Белоненко Михаил Борисович

кандидат физико-математических наук  
Калачев Алексей Алексеевич

Ведущая организация: Московский государственный универси-  
тет имени М.В. Ломоносова

Защита состоится «25» сентября 2008 г. в \_\_\_\_ часов на заседании Дис-  
сертационного Совета Д 212.081.07 в Казанском государственном универси-  
тете им. В.И. Ульянова-Ленина по адресу: 420008, г.Казань, ул. Кремлевская,  
д.18.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. Н.И. Лоба-  
чевского Казанского государственного университета.

Автореферат разослан «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук

Д.И. Камалова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

К настоящему времени исследования оптических солитонов [1] превратились в одно из важнейших направлений нелинейной оптики, лазерной физики и техники. Обнаружено множество различных типов солитонов, таких как солитоны самоиндуцированной прозрачности, пространственные, временные и пространственно-временные солитоны (световые пули), параметрические и многочастотные солитоны и многие другие. В последнее время акцент в таких исследованиях смещается в сторону оптики электромагнитных импульсов, содержащих малое число колебаний поля [2]. По сложившейся терминологии подобные образования называют предельно короткими импульсами (few-cycle pulses или ultimately short pulses в англоязычной литературе). Разработаны методы экспериментального получения предельно коротких импульсов (ПКИ) в широком интервале частот. Так, для видимого и инфракрасного диапазонов это импульсы длительностью от единиц до сотен фемтосекунд, в ультрафиолетовом и мягком рентгеновском диапазонах - аттосекундные импульсы, а для терагерцевых частот - пикосекундные импульсы.

Очень малая длительность предельно коротких импульсов делает их весьма перспективными для применения в системах оптической обработки и передачи информации. Другой существенной особенностью ПКИ является их широкий спектр, что является ценным в спектроскопических исследованиях.

По понятным причинам приближение медленно меняющихся огибающих неприменимо для описания ПКИ. К настоящему времени не существует единого подхода к теоретическому описанию взаимодействия ПКИ с различными средами, хотя и существует достаточно много моделей, успешно решающих данную задачу. Наиболее хорошо изучены ПКИ в случае изотропных сред, в то время как среды с анизотропией только начинают привлекать внимание исследователей.

Некоторые теоретические модели [3] предсказывают существование ПКИ, состоящих даже не из одного, а из половины колебания поля (half-cycle pulses), т.е. представляющие собой уединенный всплеск (горб) поля. Теория и эксперимент соответствующих образований на сегодняшний день разработаны недостаточно детально. Как правило, такие исследования не выходят за рамки одномерного приближения, поэтому изучение поперечной динамики ПКИ является актуальной задачей.

С физикой ПКИ тесно связано явление сверхуширения спектра или генерация спектрального суперконтинуума, когда ширина спектра сигнала ста-

новится сравнимой с его центральной частотой. Наиболее хорошо теория и эксперимент по генерации суперконтинуума развиты для изотропных сред видимого и инфракрасного диапазонов. В то же время представляет интерес исследование этого вопроса в случае анизотропных сред.

Не отстает от оптики и акустика предельно коротких импульсов, размер которых при длительностях порядка десятков - сотен пикосекунд всего лишь на один-два порядка превышает период кристаллической решетки [4]. Такие сигналы в связи с их малой длительностью, большой амплитудой и широким спектром представляют собой прекрасный инструмент для исследования структуры вещества.

Следует выделить такую область, как когерентная акустика низкотемпературных парамагнетиков, помещенных в постоянное магнитное поле [5]. Еще в 70-х годах исследователи заметили ее значительную аналогию с нелинейной оптикой и смогли обнаружить акустические аналоги таких явлений, как, например, самоиндуцированная прозрачность. В настоящее время поиск таких аналогий представляет собой перспективную область исследований.

Настоящая диссертационная работа посвящена исследованию способов генерации ПКИ, особенностей их взаимодействия с различными нелинейными средами, изучению поперечной динамики и поиску акустических аналогов.

## **Цель работы**

Цель работы состоит в исследовании режимов генерации и распространения оптических и акустических предельно коротких импульсов в анизотропных и изотропных средах, включая неравновесные, на основе имеющихся и новых теоретических моделей, а также изучении поперечной динамики ПКИ с помощью вариационного подхода и численного моделирования.

## **Научная новизна**

1. Сформулирована и исследована самосогласованная система нелинейных уравнений, описывающая генерацию предельно коротких импульсов терагерцовых частот в квадратично-нелинейном кристалле методом оптического выпрямления, а также ее акустический аналог для гиперзвуковых импульсов деформации.

2. Предсказано формирование спектрального суперконтинуума в терагерцовом диапазоне частот, выявлены условия и стадии его генерации.

3. Обнаружено наличие двухкомпонентных длинно-коротковолновых солитонов в одноосных кристаллах, поперечная структура, которых имеет

форму темных вихрей (вортексов) и “дырок” на поперечном фоне квази-одномерных солитонов или светлых вихрей и пуль торoidalной симметрии для локализованных решений.

4. Предсказаны солитонные режимы в виде предельно коротких импульсов продольной деформации растяжения и сжатия в низкотемпературных парамагнетиках, возникающие за счет спин-фононного взаимодействия при отличном от нуля внешнем магнитном поле.

5. Показано, что в двухуровневой среде в неравновесном состоянии могут существовать долгоживущие неоднородные солитоноподобные импульсы, распространяющиеся со сверхсветовой скоростью.

### **Практическая ценность**

Теоретические модели процессов оптического и акустического саморассеяния могут служить основой для описания существующих или будущих экспериментов. Предложенный механизм генерации спектрального суперконтинуума в терагерцовом диапазоне представляет значительную ценность для нужд спектроскопии и других смежных областей.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. На дистанции распространения в несколько дисперсионных длин оптической накачки генерируемый терагерцовый сигнал испытывает распад, порождая два суперконтинуума солитонной и несолитонной природы, что сопровождается красным сдвигом частоты импульса накачки.

2. При положительной дисперсии групповой скорости коротковолновой компоненты длинно-коротковолновые солитоны в одноосных кристаллах могут иметь поперечную структуру типа “темных” вихрей и “дырок”; в противоположном случае - локализованных “светлых” вихрей и пуль.

3. Спин-фононное взаимодействие в низкотемпературных парамагнетиках приводит к возникновению двух различных типов импульсов продольной деформации: солитонов сжатия и разрежения.

4. В неравновесной двухуровневой среде возможно сверхсветовое распространение нерезонансных неоднородных солитоноподобных импульсов за счет механизма переформирования.

### **Достоверность**

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается применением хорошо зарекомендовавших себя современных точных и приближенных теоретических методов в сочетании с численным моделированием,

основанным на использовании специализированного программного обеспечения. Ряд теоретических результатов хорошо согласуется с соответствующими экспериментальными данными.

### **Апробация основных результатов**

Результаты диссертационной работы докладывались на следующих 20 международных и российских конференциях: международных научных школах “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия” (Казань, 2003-2007 гг.), всероссийских школах-семинарах для молодых ученых “Волновые явления в неоднородных средах” (Москва, 2004 и 2006 г.), всероссийских школах-семинарах “Физика и применение микроволн” (Москва, 2005 и 2007 г.), международных конференциях молодых ученых и специалистов “Оптика” (Санкт-Петербург, 2003 и 2007 гг.), международных конференциях ICONO/LAT (Санкт-Петербург, 2005 г. и Минск, Беларусь, 2007 г.), международном симпозиуме по фотонному эху и когерентной спектроскопии ФЭКС-2005 (Калининград, 2005 г.), международной конференции “Лазерная физика и оптические технологии” (Гродно, Беларусь, 2006 г.), международной конференции “Фундаментальные проблемы оптики” (Санкт-Петербург, 2006), Курчатовских молодежных научных школах (Москва, 2006 и 2007 г.), международных чтениях по квантовой оптике (Самара, 2007 г.), конференции по физике конденсированного состояния, сверхпроводимости и материаловедению (РНЦ “Курчатовский институт”, Москва, 2007 г.).

### **Публикации**

Основные результаты диссертации изложены в 27 печатных работах, в том числе 13 печатных работ опубликовано в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Список публикаций приведен в конце автореферата.

### **Личный вклад автора**

Диссертант вместе с научным руководителем участвовал в постановке задач и обсуждении полученных результатов. Основные результаты расчетов получены лично диссертантом.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 128 страницах текста, включая 29 рисунков и список литературы из 165 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, сформулированы ее цель, задачи и основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит обзор последних достижений в исследованиях предельно коротких импульсов в нелинейной оптике и акустике. В первом параграфе кратко описана эволюция развития теоретических моделей описания нелинейного взаимодействия коротких импульсов с веществом. Отмечены существенные аналогии между многими явлениями нелинейной оптики и акустикой низкотемпературных парамагнитных кристаллов в постоянном магнитном поле.

Во втором параграфе приведен обзор исследований солитоноподобных объектов в случае нескольких пространственных измерений. Описаны основные известные к настоящему времени типы неодномерных уединенных волн (оптические пули, вихри, Х-волны и др.). Подробно рассмотрен вариационный метод усредненного лагранжиана, используемый в последующих главах наряду с численным моделированием.

Вторая глава посвящена изучению предельно коротких импульсов в половине колебания поля в анизотропных средах. В первом параграфе построена самосогласованная модель генерации терагерцового излучения методом оптического выпрямления лазерных импульсов видимого и ИК-диапазона в нелинейном кристалле с одноосной анизотропией. Суть рассматриваемого явления состоит в генерации низкочастотного излучения как разности частот, содержащихся в импульсе накачки, обладающем широким спектром. Условием эффективного протекания такого процесса (условием синхронизма) служит равенство групповой скорости  $v_g$  квазимонохроматического импульса накачки и фазовой скорости  $v_t$  предельно короткого импульса терагерцового излучения. Указанное соотношение называют также условием длинно-коротковолнового резонанса.

При выводе модели рассмотрены две основные геометрии, когда поляризация оптического импульса накачки может иметь поляризацию обыкновенной или необыкновенной волны. Генерируемое терагерцовое излучение всегда поляризовано в плоскости необыкновенной волны.

В настоящей модели реализация условия синхронизма отвечает случаю коллинеарного распространения, а также методу наклонных фронтов. Данные ситуации обладают существенными преимуществами по сравнению с традиционной черенковской геометрией, когда порождаемый сигнал генерируются в конусе. В обоих рассматриваемых случаях терагерцовый импульс распространяется вдоль выделенной оси и имеет плоский фронт. При колли-

неарной геометрии преимуществом является большая длительность взаимодействия накачки и генерированного излучения. Использование же наклонного фронта импульса накачки с фиксированной длиной волны позволяет удовлетворить условию синхронизма практически для любого кристалла.

В пространственно одномерном случае рассматриваемая модель генерации терагерцового излучения сводится к следующей системе нелинейных уравнений:

$$i\frac{\partial\psi}{\partial z} + it\mathrm{tg}\theta\frac{\partial\psi}{\partial x} + \frac{k_2}{2}\frac{\partial^2\psi}{\partial\tau^2} - \alpha\omega E_T\psi = \frac{c}{2n_0\omega}\Delta_\perp\psi, \quad (1)$$

$$\frac{\partial E_T}{\partial z} + \delta\frac{\partial E_T}{\partial\tau} + \frac{\partial}{\partial\tau}\int_0^\infty G(T)E_T(z, \tau - T)dT + \beta\frac{\partial}{\partial\tau}|\psi|^2 = \frac{c}{2n_g}\Delta_\perp\int_{-\infty}^\tau E_T d\tau'. \quad (2)$$

Данная самосогласованная система уравнений записана для огибающей  $\psi$  поля лазерного импульса с несущей частотой  $\omega$  и поля  $E_T$  терагерцового излучения. Здесь  $\tau = t - z/v_g$ , причем ось  $z$  совпадает с направлением распространения терагерцового импульса. Лазерный импульс накачки может иметь наклонный фронт, когда угол  $\theta$  между направлениями фазовой и групповой скорости (ось  $z$ ) отличен от нуля. Величина  $k_2$  учитывает дисперсию групповой скорости оптической компоненты поля, а слагаемое с интегралом в левой части уравнения (2) учитывает дисперсию и поглощение в терагерцовом диапазоне. Здесь

$$G(T) = \frac{v_g^2\omega_p^2}{2c^2\sqrt{\omega_i^2 - \gamma^2}} \exp(-\gamma T) \sin(\sqrt{\omega_i^2 - \gamma^2}T),$$

где  $\gamma$  - постоянная затухания,  $\omega_i$  и  $\omega_p$  - ионные резонансная и плазменная частоты, соответственно. Слагаемое с  $\delta$  учитывает часть отстройки между  $v_g$  и  $v_t$ , не зависящую от частоты. Коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  описывают нелинейные эффекты.

Оптический импульс накачки содержит достаточно много колебаний, поэтому для него применимо приближение медленно меняющихся огибающих. В то же время для терагерцового импульса применено только приближение квазиоднонаправленного распространения [3], позволяющее пренебречь отраженной волной и уменьшить порядок производных в соответствующем волновом уравнении.

Когда частота терагерцового сигнала лежит значительно ниже линии ионного поглощения, дисперсия в указанной низкочастотной области является слабой. Тогда уравнение (2) можно упростить, приведя его к виду

$$\frac{\partial E_T}{\partial z} + \delta_T\frac{\partial E_T}{\partial\tau} - \Gamma\frac{\partial^2 E_T}{\partial\tau^2} - \mu\frac{\partial^3 E_T}{\partial\tau^3} + \beta\frac{\partial}{\partial\tau}|\psi|^2 = \frac{c}{2n_g}\Delta_\perp\int_{-\infty}^\tau E_T d\tau', \quad (2a)$$



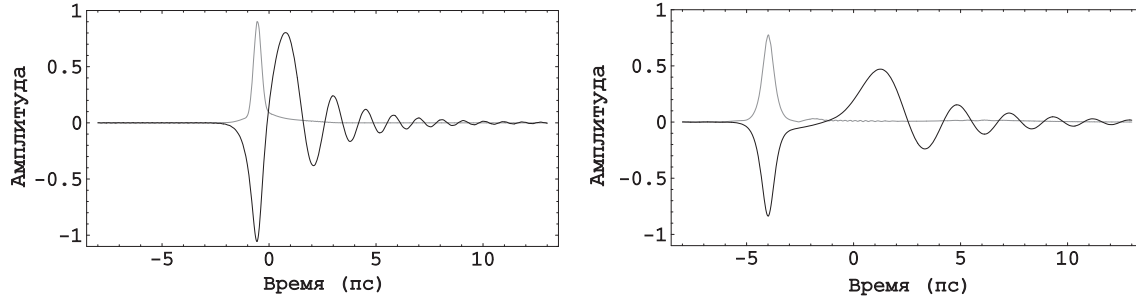


Рис. 1:

Форма импульса при длительности входного импульса 265 фс с несущей длиной волны 836 нм при пиковой интенсивности 3.6 ГВт/см в кристалле  $ZnTe$  при пробеге в среде  $z = 6$  см (слева),  $z = 24$  см (справа). Светлая линия - огибающая оптической накачки (нормирована на величину  $2.5|k_2|/(\alpha\sqrt{\omega\tau_p^3})$ ), темная линия - поле терагерцового сигнала (нормирована на величину  $1.4|k_2|/(\alpha\tau_p^2)$ ).

где третье и четвертое слагаемые учитывают поглощение и дисперсию, соответственно.

Отметим, что уравнения типа (1), (2а) могут быть получены как частный случай систем нелинейных уравнений в [6,7], описывающих взаимодействие предельно коротких импульсов в квадратично-нелинейной среде.

Численное моделирование системы (1), (2) показывает, что при длительном связанном распространении оптического импульса и порождаемого им терагерцового импульса, последний испытывает распад на две части (рис.1). Первая из них соответствует формированию двухкомпонентного солитона, состоящего из оптического импульса огибающей с несущей частотой, меньше исходной, и однополярного низкочастотного импульса. Вторая часть терагерцового сигнала представляет собой сильно модулированный импульс, содержащий нулевые частоты. Данные части терагерцового сигнала обладают сверхширокими спектрами (рис.2), так что можно говорить о формировании терагерцового суперконтинуума. На переходной стадии до непосредственного распада импульса суперпозиция указанных суперконтинуумов формирует характерную частотную гребенку (рис.2в). Следует отметить также, что при протекании процесса генерации суперконтинуума спектр оптического импульса испытывает непрерывное красное смещение, достигающее насыщения при образовании солитона. Данное смещение наблюдалось и в экспериментальных условиях [8].

Во втором параграфе представлен акустический аналог процесса оптического выпрямления, а именно, механизм преобразования импульса поперечного гиперзвука в предельно короткий импульс продольного звука. Известно, что скорости продольной и поперечной упругих волн в твердом теле

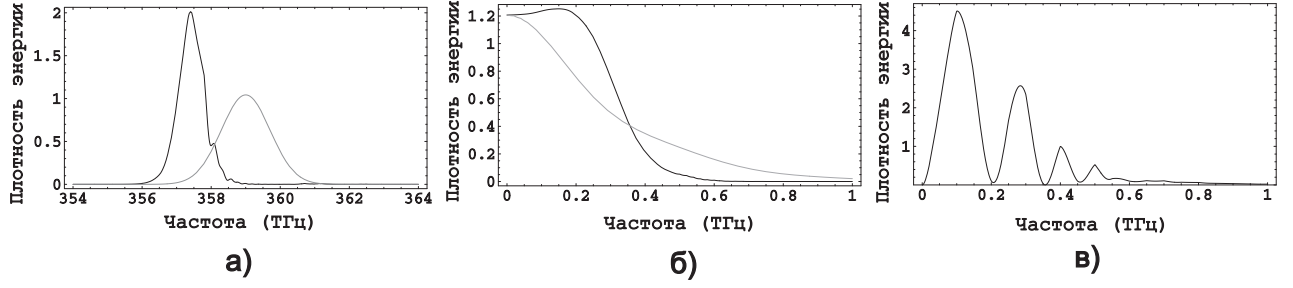


Рис. 2:

Спектры сигналов: а) красный сдвиг спектра оптического импульса. Светлая линия - спектр на входе в среду, темная линия - при пробеге  $z = 24$  см. Спектры нормированы на начальное значение; б) спектры солитонного (светлая линия) и несолитонного (темная линия) частей суперконтинуумов ( $z = 24$  см); в) результат интерференции суперконтинуумов ( $z = 24$  см). Шкала оси ординат в случаях б), в) задана в величинах  $6|k_2|^2/(\alpha\tau_p)^2$ .

различаются и порой весьма значительно. В качестве решения данной проблемы рассмотрено распространение акустической волны в кристалле, снабженном парамагнитными примесями с эффективным спином  $S = 1$  и помещенном в постоянное магнитное поле. В результате спин-фононного взаимодействия появляются дополнительные нелинейно-дисперсионные эффекты, и, что особенно важно, перенормируются линейные скорости продольного и поперечного звуков.

В этих условиях уравнения для компонент акустического поля сведутся к частному случаю уравнений (1), (2а) с учетом замен  $z \rightarrow t$ ,  $-\tau \rightarrow \xi = x - v_{g\perp}t$ ,  $k_2 \rightarrow \omega_2 = -\partial^2\omega/\partial k^2$ ,  $\omega \rightarrow k^{-1}$ ,  $(c/2n_0) \rightarrow (a_{\perp}^2/2v_{\perp})$ ,  $\alpha, \beta \rightarrow \beta_{\perp}$ , а также при условии  $\theta = \delta_T = \Gamma = \mu = 0$ .

Здесь  $\psi \rightarrow \psi_{yx}$  имеет смысл огибающей поперечного импульса деформации, а  $E_T \rightarrow \varepsilon_{xx}$  - относительной продольной деформации (без несущей частоты),  $v_{\perp}$ ,  $v_{g\perp}$  - линейные фазовая и групповая скорости поперечной компоненты,  $a_{\perp}$  - линейная скорость поперечного звука в среде без спин-фононного взаимодействия,  $\omega_2$  - параметр дисперсии групповой скорости для несущей частоты поперечной компоненты,  $k$  - волновое число,  $\beta_{\perp}$  - коэффициент нелинейности, определяемый постоянной Грюнайзена.

Выполнение условия синхронизма зависит от величины магнитного поля. Так, для частот зеемановского расщепления  $\omega_0 \sim 10^{12}c^{-1}$  данное условие можно удовлетворить для гиперзвуковых частот  $\omega \sim 10^9c^{-1} - 10^{11}c^{-1}$ .

В одномерном случае описанный вариант системы уравнений (1), (2а) является интегрируемым и имеет солитонные решения. Характерным отличием от оптического аналога является отсутствие сильной дисперсии для генерируемого сигнала (рис.3). Поэтому несолитонный суперконтинуум здесь не образуется. Также имеется и красный сдвиг частоты импульса накачки.

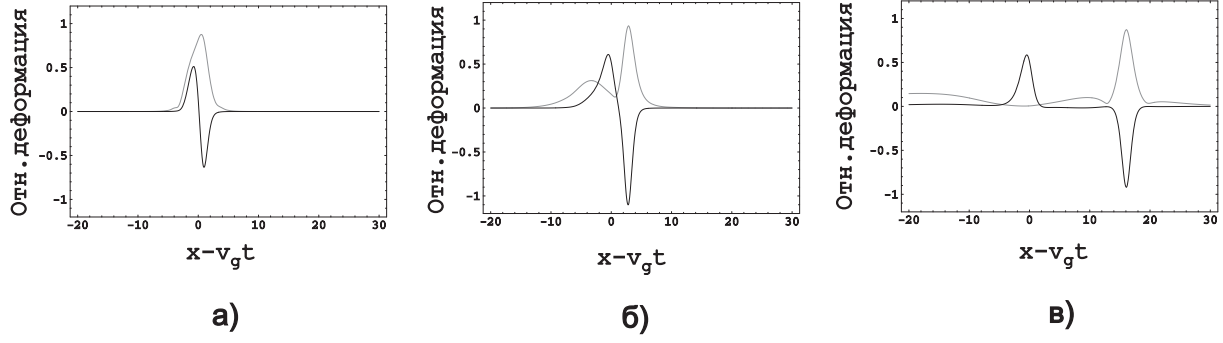


Рис. 3:

Эволюция импульса в процессе саморассеяния в случае положительной ДГС ( $\omega_2 > 0$ ) в моменты времени  $t = l_0^2/|\omega_2|$  (а),  $t = 4l_0^2/|\omega_2|$  (б),  $t = 20l_0^2/|\omega_2|$  (в). Величины модуля огибающей поперечной компоненты  $|\psi_{yx}|$  (светлая линия) и поля продольной компоненты  $\varepsilon_{xx}$  (темная линия) нормированы на  $|\omega_2|/(\beta_\perp \sqrt{k l_0^3})$  и  $|\omega_2|/(\beta_\perp k l_0^1)$ , соответственно. Пространственный масштаб задан в единицах начальной протяженности  $l_0$  поперечного импульса.

Отметим, что без применения приближения однонаправленного распространения к (2а), полученная система уравнений при  $\theta = \delta_T = \Gamma = 0$  описывает также эволюцию электросолитонов Давыдова в квазиодномерной молекулярной цепочке [A13]. В этом случае  $\psi$  имеет смысл волновой функции электрона, а  $E_T$  - поля создаваемой им деформации.

В третьем параграфе данной главы рассмотрена поперечная динамика решений (в первую очередь, солитонов) уравнений (1),(2а) при  $\theta = 0$ . При расчетах использовались вариационный метод усредненного лагранжиана и численное моделирование.

Следуя формализму работы [9], выбор пробных решений производился введением “медленной” и “быстрой” неизвестных функций координат  $\rho$  и  $\Phi$ , заменяющих в одномерном солитонном решении обратную длительность и фазу квазимонохроматического импульса, соответственно. После подстановки пробного решения в лагранжиан и усреднения его по времени запись уравнений Эйлера-Лагранжа, соответствующих “усредненному” лагранжиану, дает квазигидродинамическую систему вида

$$\frac{\partial \rho}{\partial z} + \nabla_\perp (\rho \nabla_\perp \phi) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{(\nabla_\perp \phi)^2}{2} + \frac{k_2}{2}(\rho^2 - \Omega^2) = d_\perp \frac{\Delta_\perp \sqrt{\rho}}{\sqrt{\rho}}. \quad (4)$$

Здесь  $d_\perp = (c/3n_0\omega)[(\pi^2/6 + 2) + (n_0\omega)(n_g\Omega)^{-1}(\pi^2/3 - 2)]$ ,  $\Omega$  - сдвиг частоты квазимонохроматического импульса в красную область, соответствующий солитонному режиму.

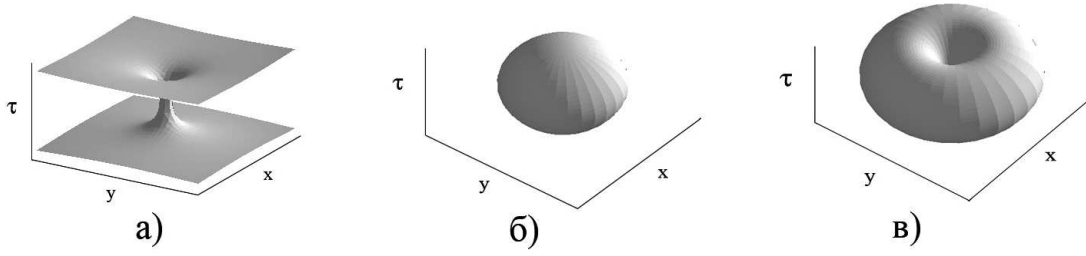


Рис. 4:

Типы пространственно-временной структуры двухкомпонентных солитонов в одноосном кристалле. Изображены изоповерхности половинной интенсивности. Случай (а) соответствует “темным” дырочно-вихревым солитонам (дефекту), (б) - оптическим “пулям”, (в) - “светлым” дырочно-вихревым солитонам.

Система (3), (4) может быть записана в виде одного уравнения для комплексной функции, связанной с параметрами солитона преобразованием Маделунга

$$\Psi = \sqrt{\rho} \exp[i(0.5k_2\Omega^2 z - \Phi)]. \quad (5)$$

Соответствующее уравнение имеет вид

$$i\frac{\partial \Psi}{\partial z} - \frac{c}{2n_0\omega} \Delta_{\perp} \Psi + \frac{k_2}{2} |\Psi|^4 \Psi + \frac{c}{2n_0\omega} (1 - \nu_0^{-2}) \frac{\Psi}{|\Psi|} \Delta_{\perp} |\Psi| = 0. \quad (6)$$

Анализ данного уравнения, напоминающего уравнение эволюции нелинейного пучка излучения, позволяет исследовать возможные типы поперечной структуры солитонов интегрируемого случая уравнений (1), (2а), а также рассмотреть их динамику.

Ключевым в поперечной динамике является знак коэффициента дисперсии групповой скорости (ДГС)  $k_2$  квазимонохроматического импульса накачки.

Когда ДГС является положительной ( $k_2 > 0$ ), локализованные во всех измерениях решения невозможны - здесь существуют только квазиодномерные солитоны с локализацией только по времени. В случае трех пространственных переменных они могут нести поперечные дефекты типа темных вихрей и дырок (рис.4а). Отметим, что для трехмерного пространственно-временного НУШ такие решения были получены практически недавно [10].

Если же ДГС является отрицательной ( $k_2 < 0$ ), то возможна локализация во всех измерениях. Соответствующие решения имеют вид двухкомпонентных пространственно-временных пульс (рис.4б). В трехмерном случае существуют также решения типа связанных состояний типа светлый вихрь - “дырка” (пуля с тороидальной симметрией) (рис.4в).

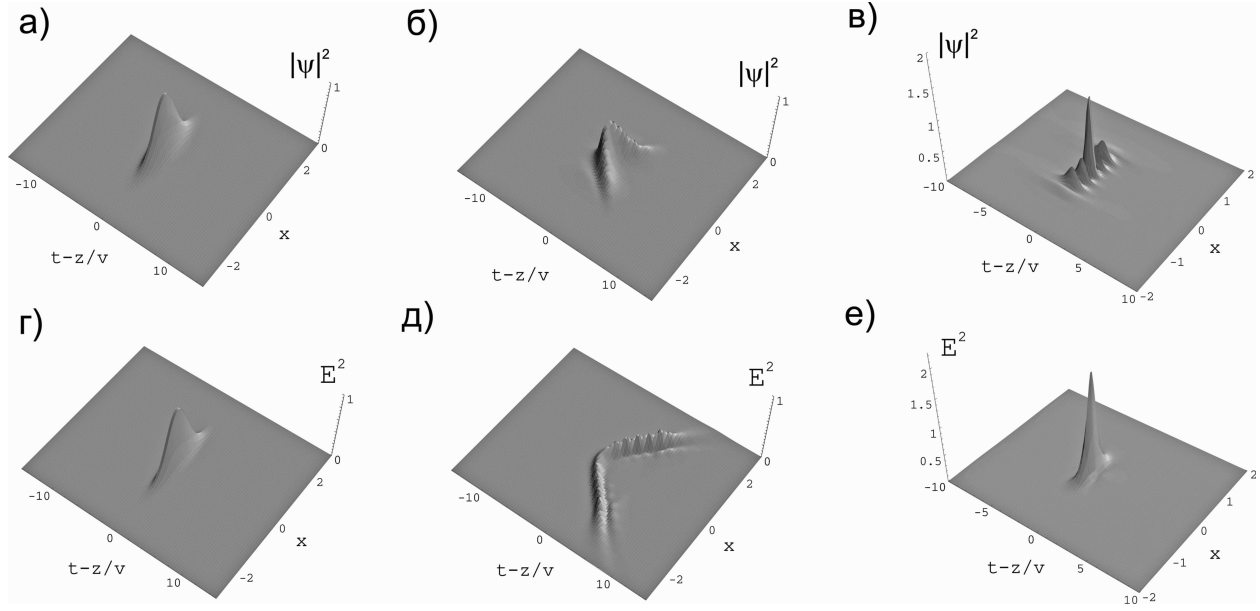


Рис. 5:

Поперечная динамика двухкомпонентных солитонов: а),г) - на входе в среду; б),д) - дефокусировка в случае положительной ДГС; в),е) - самофокусировка в случае отрицательной ДГС.

Эволюция квазиодномерных двухкомпонентных солитонов изучалась непосредственным численным моделированием соответствующего частного случая уравнений (1), (2а). Изначально локализованные солитоны неустойчивы. В случае положительной ДГС они испытывают дефокусировку (рис.5). При этом наблюдается значительное искривление волнового фронта, а также возникновение небольших аберраций (рис.5б,д). В случае отрицательной ДГС солитоны самофокусируются при превышении критической мощности, причем квазимонохроматический импульс может в процессе коллапса разбиваться на отдельные филаменты (рис.5в,е).

В третьей главе исследуется распространение нерезонансных пикосекундных солитоподобных импульсов продольного звука под произвольным углом к направлению внешнего магнитного поля, в которое помещен кристалл, содержащий парамагнитные примеси с эффективным спином  $S = 1$ . Магнитное поле при этом направлено вдоль одной из осей симметрии кубического кристалла.

Систему материальных уравнений для элементов матрицы плотности, дополняющую волновое уравнение, можно приближенно разрешить, используя свойство нерезонансности взаимодействия акустического импульса с системой квантовых переходов. Используя разложение по малому параметру  $(\omega_0 \tau_p)^{-2} \ll 1$ , где  $\omega_0$  - частота зеемановских расщеплений внутри триплета,  $\tau_p$  - характерная длительность импульса, можно выразить материальные

переменные через полевые.

В результате, используя приближение квазиоднонаправленного распространения, получим

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \beta_2 \varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial \zeta} + \beta_3 \varepsilon^2 \frac{\partial \varepsilon}{\partial \zeta} + \beta \frac{\partial^3 \varepsilon}{\partial \zeta^3} = -\frac{a_{\perp}^2}{2a} \Delta_{\perp} \int_{-\infty}^{\zeta} \varepsilon d\zeta', \quad (7)$$

где  $\varepsilon$  - относительная деформация,  $\zeta = z - at$ ,  $a$  - скорость продольного звука, перенормированная в результате спин-фононного взаимодействия, коэффициенты  $\beta_2$ ,  $\beta_3$ ,  $\beta$ , которые зависят от параметров среды, величины магнитного поля и угла  $\vartheta$  между направлением магнитного поля и направлением распространения (ось  $z$ ), учитывают нелинейные и дисперсионные эффекты акустической и спин-фононной природы.

Уравнение (7) в одномерном случае имеет солитонные решения двух типов: импульсы сжатия ( $\varepsilon_- < 0$ ) и импульсы растяжения ( $\varepsilon_+ > 0$ ). В случае отсутствия внешнего магнитного поля коэффициентом кубической нелинейности  $\beta_3$  можно пренебречь. В этом случае за счет чисто акустических нелинейности и дисперсии возможно существование только импульсов сжатия, наблюдавшихся авторами [4], которые удовлетворяют уравнению Кортевега де Вриза. Если же магнитное поле отлично от нуля, то роль кубической нелинейности возрастает. Тогда при определенных условиях на величину магнитного поля могут существовать как импульсы сжатия, так и импульсы растяжения. Кроме того, коэффициент  $\beta_3$  может менять знак в зависимости от угла  $\vartheta$ , что меняет структуру решения. В результате при  $\beta_3 < 0$  возможны лишь волны сжатия.

Поперечная динамика импульсов сжатия и растяжения сводится к их дефокусировке. Это подтверждается как результатами на основе вариационного подхода, состоящего в изучении аналога системы уравнений типа (3),(4) для рассматриваемых солитонов, так и непосредственным численным моделированием уравнения (7). Импульсы сжатия дефокусируются в автономном режиме (рис.6а,б), т.е. происходит увеличение их радиуса и длительности, но с сохранением формы импульса. В случае же импульсов растяжения, дефокусировка носит неавтономный характер (рис.6в,г) - после возникновения аббераций импульс разбивается на осциллирующие сгустки.

Четвертая глава посвящена изучению локализованных структур электромагнитного излучения, движущихся со скоростями, превышающими скорость света в вакууме в сильнонеравновесных средах. Экспериментальные наблюдения распространения световых импульсов со скоростями  $v/c \sim 6-9$  в усиливающей среде были произведены еще на заре развития лазерной техники в конце 60-х годов [11]. Важно отметить, что такое распространение

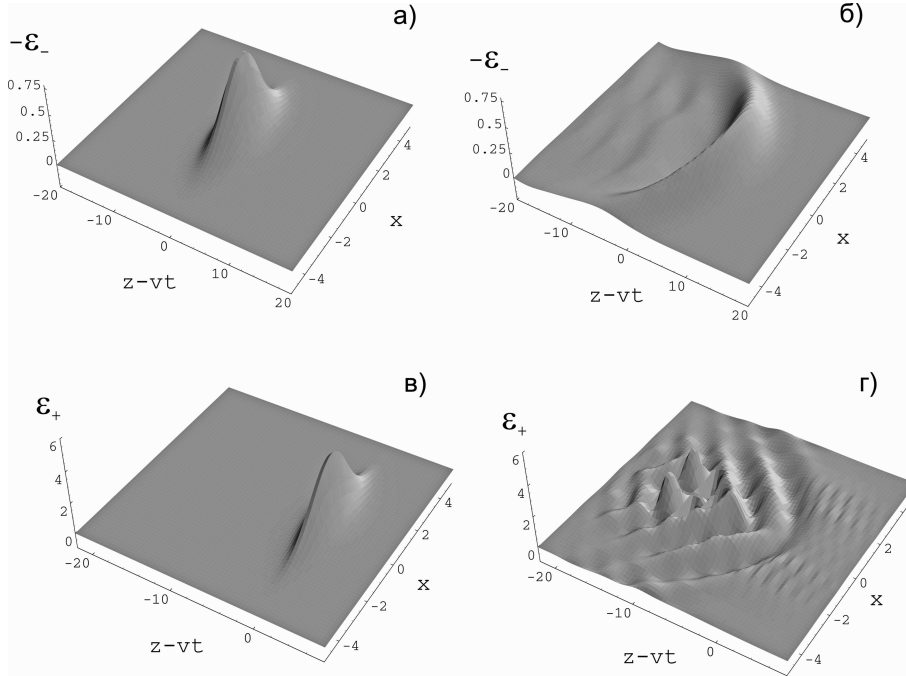


Рис. 6:

Поперечная динамика импульсов сжатия ( $\varepsilon_-$ ) и растяжения ( $\varepsilon_+$ ): а), в) - на входе в среду; б), г) - дефокусировка при пробеге в 4 длины дисперсионного расплывания.

не противоречит принципу причинности. При прохождении передним фронтом импульса среды с инверсией населенностей атомов происходит “сброс” последних в основное состояние, сопровождающийся локальным усилением импульса. В то же время задний фронт импульса, встречающий на своем пути атомы уже в равновесном состоянии, ослабляется. Таким образом, речь идет о формировании нового эффективного максимума волны, скорость которого и фиксируется как сверхсветовая. Однако передача энергии от точки к точке по-прежнему происходит со скоростями не выше  $c$ , так что сверхсветовая передача информации невозможна. Описанный механизм в литературе получил название механизма переформирования [12].

В настоящей главе рассматриваются предельно короткие электромагнитные импульсы в неравновесной среде из двухуровневых атомов двух сортов. Проведено исследование их устойчивости в сверхсветовом режиме распространения в случаях одного и двух пространственных измерений.

Здесь рассмотрена среда, имеющая двухуровневые квантовые системы двух типов. Спектр импульса таков, что он перекрывает собственные частоты  $\omega_1$  квантовых переходов первого типа, но не содержит фурье-компонент, резонансных частотам  $\omega_2$  переходам второго типа. По этой причине назовем 1-переходы резонансными, а 2-переходы - нерезонансными. Указанное

условие можно записать в форме двойного неравенства

$$\omega_1^2 \ll \tau_p^{-2} \ll \omega_2^2. \quad (8)$$

Считаем также, что длительность импульса много меньше характерных времен релаксации среды.

В соответствии с последним замечанием, введем два малых параметра  $\varepsilon_1 \equiv (\omega_1 \tau_p)^2$  для резонансных атомов, и  $\varepsilon_2 \equiv (\omega_2 \tau_p)^{-2}$  для нерезонансных. Пользуясь данным обстоятельством, можно приближенно выразить дипольный момент и инверсию населенностей через поле импульса. В результате исходная система уравнений Максвелла-Блоха редуцируется к нелинейному волновому уравнению вида [A1]

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial z \partial \tau} + a \sin \theta - \frac{3b}{2} \left( \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \right)^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial \tau^2} - b \frac{\partial^4 \theta}{\partial \tau^4} = \frac{c}{2N} \Delta_{\perp} \theta, \quad (9)$$

где  $\theta = \frac{2d_1}{\hbar} \int_{-\infty}^t E dt'$ ,  $E$  - электрическое поле импульса,  $d$  - дипольный момент,  $\tau = t - z/v_0$ ,  $v_0 = c/N$ ,  $N$  - линейный показатель преломления, создаваемый переходами 2-типа,  $a$  и  $b$  - коэффициенты, описывающие нелинейные и дисперсионные эффекты от взаимодействия импульса с квантовыми уровнями 1 и 2 типов, соответственно. При нахождении соответствующих компонент в неравновесном состоянии коэффициенты  $a$  и  $b$  отрицательны.

Аналогичное уравнение использовалось в [A3] для описания поперечной динамики краевой дислокации типа краудина. В этом случае  $\theta$  соответствует смещению атомов из равновесного состояния, а  $E$  возникающей при этом деформации. Второе слагаемое в (9) описывает влияние потенциала кристаллической подложки, а второе и третье - анграмонизму межатомного взаимодействия и пространственной дисперсии, соответственно. Коэффициенты  $a$  и  $b$  при этом положительны.

Уравнение (9) в одномерном случае (при отсутствии правой части) допускает точные решения типа однополярных солитонов. При нахождении одной или обеих компонент среды в неравновесном состоянии, скорость такого солитона может превышать скорость света в вакууме. Численное моделирование уравнения (9) показывает, что солитонные импульсы неустойчивы, когда в неравновесном состоянии находятся резонансные квантовые переходы ( $a < 0$ ). При этом любое малое возмущение переводит атомы данной компоненты в равновесное состояние и солитон становится досветовым. При нахождении же в неравновесном состоянии атомов нерезонансной составляющей, одномерный сверхсветовой солитон устойчив. Говоря об устойчивости, здесь не следует забывать, что неравновесная среда сама по себе неустойчива и за время релаксации переходит в равновесное состояние.



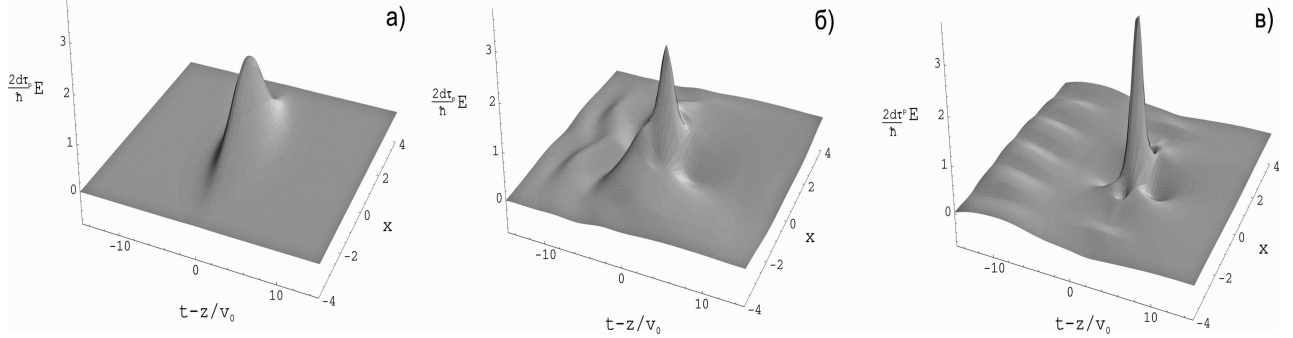


Рис. 7:

Эволюция импульса в случае среды с 2-компонентой в инвертированном состоянии ( $a = 0$ ,  $b < 0$ ): а) на входе в среду, (б),(в) при пробеге 2 и 10 длин дисперсионного расплывания. Формирование двумерного солитона.

Таким образом, время жизни нерезонансных сверхсветовых солитонов в одномерном приближении ограничивается только временем жизни среды в неравновесном состоянии.

Поперечная динамика солитонов в среды в равновесном состоянии сводится к их дефокусировке. Отметим также, что данный процесс характерен и для динамики краевой дислокации типа краудина ввиду отмеченной выше аналогии уравнения (9) при  $a > 0, b > 0$  с таковым для данных дислокаций.

Численное моделирование уравнения (9), показывает, что в среде, содержащей только нерезонансные атомы в инвертированном состоянии ( $a = 0, b < 0$ ), возможно формирование неодномерных сверхсветовых солитонов (рис.7). Данные образования сохраняют свою форму при распространении если  $L_{\parallel} L_{dis} / R^2 < 0.15$ , где  $L_{\parallel}$  - характерный продольный размер солитона,  $R$  - его поперечный радиус,  $L_{dis}$  - длина дисперсионного расплывания. При наличии же в среде атомов, резонансно взаимодействующих с импульсом, указанные солитоны неустойчивы.

Таким образом, сверхсветовые неодномерные локализованные импульсы в неравновесной двухуровневой среде могут распространяться с сохранением формы при условии, что их спектр не перекрывает характерные частоты квантовых переходов.

В заключении диссертации подведены итоги исследования, перечислены полученные результаты и выводы.

## Основные результаты и выводы

1. Получена самосогласованная система нелинейных уравнений, описывающая генерацию предельно коротких импульсов терагерцовых частот в квадратично-нелинейном кристалле методом оптического выпрямления. Рассмотрена коллинеарная геометрия и метод наклонных фронтов. Подтвержден красный сдвиг частоты импульса накачки, наблюдаемый в экспериментах.

2. Показано, что при генерации терагерцового сигнала возможно формирование терагерцовых суперконтинуумов, соответствующих солитону в половине колебания поля и модулированному импульсу, которые образуются при распаде порожденного низкочастотного сигнала. Выявлены переходная и асимптотическая стадии генерации суперконтинуумов.

3. Предсказан акустический аналог процесса оптического выпрямления, имеющий место в низкотемпературных парамагнитных кристаллах в постоянном магнитном поле. Несолитонный суперконтинуум здесь не образуется.

4. Исследована поперечная структура решений системы длинно-коротковолнового резонанса. В случае положительной дисперсии групповой скорости оптической волны они представляют собой дефекты на поперечном фоне квазиодномерного импульса типа “темных” вихрей и дырок. В противном случае возможно образование локализованных структур типа “светлых” вихрей и оптических пуль.

5. Показано, что действие внешнего постоянного магнитного поля на парамагнитный кристалл путем возникновения дополнительных нелинейных и дисперсионных эффектов в среде за счет спин-фононного взаимодействия приводит к возможности реализации двух различных солитонных режимов распространения - импульсов сжатия и растяжения. В среде же без магнитного поля возможны только импульсы сжатия. Рассмотрено распространение импульсов под произвольным углом к направлению поля и их поперечная динамика.

6. Исследовано распространение и поперечная динамика предельно коротких импульсов в неравновесной среде из двухуровневых атомов. Показано, что если спектр таких импульсов не перекрывает характерной частоты квантовых переходов, то возможно существование неоднородных сверхсветовых импульсов с сохраняющейся формой.

### Список публикаций по теме диссертации

- [A1] **Bugay, A.N.** Faster than light propagation of electromagnetic solitons in nonequilibrium medium taking account of diffraction / A.N. Bugay, S.V. Sazonov // Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics. -2004. -V.6. -P.328-335.
- [A2] **Бугай, А.Н.** О возможности управления динамикой пикосекундных акустических импульсов в парамагнитном кристалле с помощью магнитного поля / А.Н. Бугай, С.В. Сазонов // Известия РАН. Серия физическая. -2004. -Т.68. №12. -С.1697-1701.
- [A3] **Бугай, А.Н.** О влиянии поперечных возмущений на движение краевой дислокации / А.Н. Бугай, С.В. Сазонов // Физика твердого тела. -2005. -Т.47. №4. -С.622-627.
- [A4] **Бугай, А.Н.** О влиянии поперечных возмущений на распространение пикосекундных акустических импульсов в парамагнитном кристалле / А.Н. Бугай, С.В. Сазонов // Физика твердого тела. -2005. -Т.47. №10. -С.1839-1845.
- [A5] **Бугай, А.Н.** Влияние дифракции на распространение электромагнитных солитонов в среде с квадратичной и кубической нелинейностью / А.Н. Бугай, С.В. Сазонов // Известия РАН. Серия физическая. -2006. -Т.70. №1. -С.114-117.
- [A6] **Бугай, А.Н.** Трехмерные длинно-коротковолновые солитоны / А.Н. Бугай, С.В. Сазонов // Известия РАН. Серия физическая. -2006. -Т.70. №12. -С.1782-1786.
- [A7] **Bugay, A.N.** Hole-Vortex Solitons / A.N. Bugay, S.V. Sazonov // Physical Review E. -2006. -V.74. №6. -P.066608-1-066608-8.
- [A8] **Бугай, А.Н.** Солитоноподобные режимы распространения пикосекундных акустических импульсов в парамагнитном кристалле / А.Н. Бугай, С.В. Сазонов // Физика твердого тела. -2007. -Т.49. №1. -С.113-120.
- [A9] **Бугай, А.Н.** Длинно-коротковолновые оптические пули и вихри / А.Н. Бугай, С.В. Сазонов // Ученые записки Казанского государственного университета. Серия: физ.-мат. науки. -2007. -Т.149. -Кн.1. -С.13-19.
- [A10] **Бугай, А.Н.** Солитонный механизм преобразования частоты акустического импульса в красную область / А.Н. Бугай, С.В. Сазонов // Известия РАН. Серия физическая. -2008. -Т.72. №1. -С.41-47.

- [A11] **Бугай, А.Н.** Генерация терагерцового суперконтинуума при саморассеянии фемтосекундного импульса в режиме оптического выпрямления / А.Н. Бугай, С.В. Сазонов // Письма в ЖЭТФ. -2008. -Т.87. №8. -С.470-476.
- [A12] **Бугай, А.Н.** Солитонный режим непрерывного стоксова саморассеяния гиперзвука в парамагнитном кристалле / А.Н. Бугай, С.В. Сазонов // ЖЭТФ. -2008. -Т.134. №2(8). -С.8137.
- [A13] **Бугай, А.Н.** Электросолитоны в молекулярной цепи при учете высших пространственных измерений / А.Н. Бугай, С.В. Сазонов // Теоретическая физика. -2008. -Т.9. -С.86-92.
- [A14] **Бугай, А.Н.** Дифракция электромагнитных солитонов в неравновесной среде / А.Н. Бугай // VII Всероссийская молодежная научная школа “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия”: сб. статей / Казань: КГУ. -2003. -С.121.
- [A15] **Бугай, А.Н.** Особенности распространения предельно коротких импульсов в среде с квадратично-кубической нелинейностью при учете поперечных возмущений / А.Н. Бугай // VIII Международная научная школа “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия” : сб. статей / Казань: КГУ. -2004. -С.44.
- [A16] **Бугай, А.Н.** Многомерные оптические квазисолитоны / А.Н. Бугай // IX Международная научная школа “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия” : сб. статей / Казань: КГУ. -2005. -С.57-60.
- [A17] **Bugay, A.N.** The influence of transverse perturbations on propagation of extremely short pulses in media with quadratic-cubic nonlinearity / A.N. Bugay, S.V. Sazonov // Proceedings of SPIE (ICONO 2005: Nonlinear Space-Time Dynamics, ed. by N.N. Rosanov). -2006. -V.6255. -P.62550G.
- [A18] **Bugay, A.N.** Transverse structure of optical solitons under self-diffraction conditions / A.N. Bugay, S.V. Sazonov // Proceedings of SPIE (Photon Echo and Coherent Spectroscopy 2005, ed. by V.V.Samartsev). -2006. -V.6181. -P.61810N.
- [A19] **Бугай, А.Н.** Трехмерные дырочно-вихревые солитоны / А.Н. Бугай, С.В. Сазонов // Лазерная физика и оптические технологии: материалы VI международной конференции / Гродно: ГрГУ. -2006. -Ч.2. -С.59-61.
- [A20] **Бугай, А.Н.** Дырочно-вихревые солитоны / А.Н. Бугай, С.В. Сазонов // Труды IV Международной конференции “Фундаментальные проблемы оптики” / СПб: Изд. дом “Corvus”. -2006. -С.278-280.

- [A21] **Бугай, А.Н.** Трехмерные длинно-коротковолновые пули и вихри / А.Н. Бугай, С.В. Сазонов // X Международная научная школа “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия”: Сборник статей / Казань: КГУ. -2006. -С.59-67.
- [A22] **Бугай, А.Н.** Солитоноподобные акустические импульсы в низкотемпературном парамагнитном кристалле / А.Н. Бугай // Сборник аннотаций работ на IV Курчатовской молодежной научной школе / Москва: РНЦ “Курчатовский институт”. -2006. -С.90.
- [A23] **Бугай, А.Н.** Преобразование спектра оптического сигнала в одноосном кристалле, сопровождаемое генерацией широкополосного терагерцового импульса / А.Н. Бугай // Труды V Международной конференции молодых ученых и специалистов “Оптика- 2007” / Санкт-Петербург. СПбГУ ИТМО. -2007. -С.40.
- [A24] **Бугай, А.Н.** Эволюция терагерцового импульса при распространении в квадратично-нелинейном кристалле в условиях слабого поглощения / А.Н. Бугай, С.В. Сазонов // XI Международная молодежная научная школа “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия”: Сборник статей / Казань. КГУ. -2007. -С.196-200.
- [A25] **Бугай, А.Н.** Генерация широкополосных импульсов и преобразование спектра акустических волн в низкотемпературном парамагнитном кристалле / А.Н. Бугай // Сборник аннотаций работ на V Курчатовской молодежной научной школе / Москва: РНЦ “Курчатовский институт”. -2007. -С.80.
- [A26] **Бугай, А.Н.** Непрерывная деформация спектра фемтосекундного оптического сигнала при черенковском механизме генерации широкополосного терагерцового импульса / А.Н. Бугай, С.В. Сазонов // Сборник аннотаций докладов конференции по физике конденсированного состояния, сверхпроводимости и материаловедению / Москва: РНЦ “Курчатовский институт”. -2007. -С.197.
- [A27] **Bugay, A.N.** Long-short-wave Optical Solitons in Uniaxial Crystals / A.N. Bugay, S.V. Sazonov // Proceedings of SPIE (International Workshop on Quantum Optics 2007, ed. by V.V.Samartsev). -2008. -V.7024. -P.70240W.

### Список цитируемой литературы

- [1] **Сухоруков, А.П.** Нелинейные волновые взаимодействия в оптике и радиофизике / А.П. Сухоруков. -Москва: Наука. -1988. -231с.
- [2] **Brabec, Т.** Intense few-cycle laser fields: Frontiers of nonlinear optics / Т.Brabec, F.Krausz // Reviews of Modern Physics. 2000. -V.72. №2. -P.545-591.
- [3] **Беленов, Э.М.** О некоторых решениях уравнений нелинейной оптики без приближения медленно меняющихся амплитуд и фаз / Э.М. Беленов, А.В. Назаркин // Письма в ЖЭТФ. -1990. -Т.51. №5. -С.252-255.
- [4] **Нао, Н.У.** Experiments with acoustic solitons in crystalline solids / Н.У. Нао, Н.Н. Марис // Physical Review B. -2001. -V.64. -P.064302.
- [5] **Голенищев-Кутузов, В.А.** Магнитная квантовая акустика / В.А. Голенищев-Кутузов, В.В. Самарцев, Н.К. Соловаров, Б.М. Хабибулин. -Москва: Наука. -1977.
- [6] **Дубровская, О.Б.** О взаимодействии оптических импульсов с малым числом периодов в средах с квадратичной нелинейностью / О.Б. Дубровская, А.П. Сухоруков // Известия РАН. Серия физическая. -1992. -Т.56. №12. -С.184-188.
- [7] **Сазонов, С.В.** О нелинейном распространении предельно коротких импульсов в оптически одноосных средах / С.В. Сазонов, А.Ф. Соболевский // ЖЭТФ. -2003. -Т.123. №6. -С.1160-1178.
- [8] **Степанов, А.Г.** Модификация спектра фемтосекундного лазерного импульса при высокоэффективной генерации терагерцового излучения методом оптического выпрямления / А.Г. Степанов, А.А. Мельников, В.О. Компанец, С.В. Чекалин // Письма в ЖЭТФ. -2007. -Т.85. -С.279-282.
- [9] **Жданов, С.К.** Квазигазовые неустойчивые среды / С.К. Жданов, Б.А. Трубников. -М.: Наука. -1991.
- [10] **Efremidis, N.K.** Three-dimensional vortex solitons in self-defocusing media / N.K. Efremidis, K. Hizanidis, B.A. Malomed, P. DiTrapani // Phys. Rev. Lett. -2007. -V.98. -P.113901.
- [11] **Басов, Н.Г.** Нелинейное усиление импульса света / Н.Г. Басов, Р.В. Амбарцумян, В.С. Зуев, П.Г. Крюков, В.С. Летохов // ЖЭТФ. -1966. -Т.50. №1. -С.23-34.
- [12] **Ораевский, А.Н.** Сверхсветовые волны в усиливающих средах / А.Н. Ораевский // УФН. -1998. -Т.168. №12. -С.1311-1321.